

Zdeněk KALÁB¹, Josef ALDORF², Eva HRUBEŠOVÁ³

**ANALÝZA GEOFYZIKÁLNÍCH METOD PRO VYHLEDÁVÁNÍ INŽENÝRSKÝCH SÍTÍ
V PŘEDPOLÍ RAŽENÝCH PODZEMNÍCH DĚL**

Abstract

Summary of geophysical methods applicable to detection of cable network in foreground of shallow underground works is presented in this contribution. Geoelectrical methods, especially multielectrode resistivity tomography, are often used. Elaboration of table with recommended geophysical methods for task under discussion is the main result of this study.

ÚVOD

Ražba mělkých důlních děl v městské zástavbě představuje výstavbu komunikací a komunikačních přípojek, kolektorů, podzemních garáží a dalších stavebních objektů v mělkém podzemí. Realizace důlních děl v malých hloubkách je spojeno mimo jiné s rizikem možného střetu s inženýrskými sítěmi (především kabely a potrubí). Tomuto tématu byla věnována etapa č. 9 projektu ČBÚ č. 38-05 "Vedení podzemních děl v souvislé městské zástavbě", který byl řešen v letech 2005 – 2007. V rámci etapy byl zpracován přehled a možnosti využití geofyzikálních metod pro vyhledávání podzemních překážek lokalizovaných v okolí mělce uložených podzemních děl, např. kolektory, kanalizační štol apod. (Aldorf et al., 2007).

Na úvod je dobré si připomenout, že geofyzikální metody se zabývají fyzikálními poli zemského tělesa. Geofyziku dělíme na jednotlivé metody podle fyzikálního principu a charakteru pole, které proměřujeme. Tíhové pole zkoumáme gravimetrickými metodami, magnetické pole magnetometrickými metodami, geoelektrické pole geoelektrickými metodami, pole elastických vln seizmickými metodami, radioaktivní pole radiometrickými metodami a metodami jaderné geofyziky, tepelné pole geotermickými metodami (např. Mareš et al., 1990). Při interpretaci geofyzikálních dat se setkáváme s pojmem přímá a obrácená úloha. Při řešení přímé úlohy hledáme pro rušivé těleso o známé velikosti, tvaru, hloubce uložení a fyzikálních vlastnostech účinek odpovídajícím fyzikálním poli. Tato úloha je vždy jednoznačná. Při řešení obrácené úlohy hledáme k anomálii ve fyzikálním poli odpovídající rušivé těleso. Tato úloha bývá většinou víceznačná. Aby se stala jednoznačnou, je třeba využít kombinace několika geofyzikálních metod nebo doplňujících geologických informací.

**REŠERŠE POUŽITÍ GEOFYZIKÁLNÍCH METOD K DETEKCI KABELŮ A
POTRUBÍ**

Rozvoj přístrojové techniky pro geofyzikální průzkum způsobil rozšíření aplikace těchto metod do dalších oblastí, mj. i do geotechnického inženýrství. Nejpoužívanější geofyzikální metody v této aplikaci jsou geoelektrické a seizmické metody. Příklady použití geofyzikálních metod při řešení konkrétních úkolů inženýrsko-geologického a geotechnického průzkumu jsou uvedeny například v účelové publikaci prof. Mareše et al. (2003) nebo prof. Karouse (1998). Je zřejmé, že pro tyto aplikace již nemusí jít jen o pole přirozená či pole vyvolaná v dané geologické struktuře, ale že půjde i o případy uměle vyvolaných polí nad umělými prvky.

¹ Doc. RNDr., CSc., Ústav geoniky AV ČR, v.v.i., Studentská 1768, Ostrava, kalab@ugn.cas.cz, též VŠB Technická univerzita Ostrava, fakulta stavební, L. Poděstě 1875, Ostrava

² Prof., Ing., DrSc., VŠB - Technická univerzita Ostrava, fakulta stavební, L. Poděstě 1875, Ostrava, josef.aldorf@vsb.cz

³ Doc., RNDr., Ph.D., VŠB - Technická univerzita Ostrava, fakulta stavební, L. Poděstě 1875, Ostrava, eva.hrubesova@vsb.cz

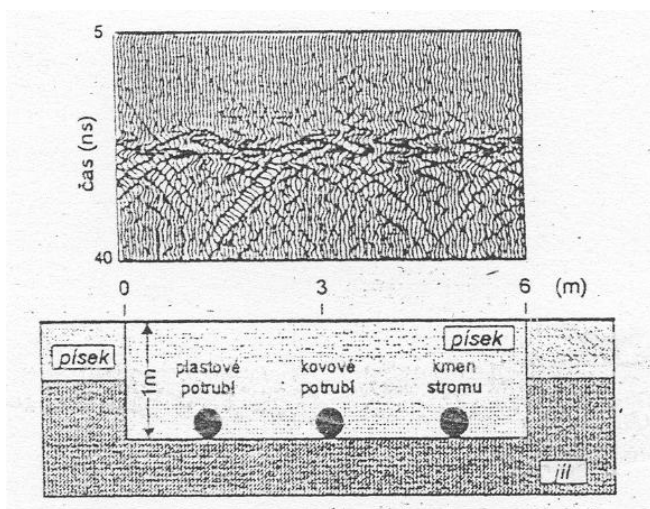
Cílem této rešerše bylo doložit použití geofyzikálních metod k detekci kabelů a potrubí. Kovové potrubí a vodivé kabely lze vyhledávat komplexem geoelektrických metod:

- kombinovaným odporovým profilováním nebo multielektrodevým odporovým měřením
- metodou VDV (velmi dlouhých vln)
- metodou DEMP (dipólového elektromagnetického profilování)
- konduktometry, tzv. metaldetektory, anténami při použití frekvence elektromagnetického pole
- georadarem
- velmi citlivými magnetometry nebo gradiomagnetometry

Kameninové, PVC a jiná potrubí a kabely z elektricky nevodivých materiálů lze detekovat georadarem, seizmickým měřením při použití vibračního zdroje a multielektrodevým měřením (existuje-li dostatečný odporový kontrast vůči „hostujícímu prostředí“), ojediněle i bezdotykovým termickým měřením.

Je-li zastižena část kabelu či kovového potrubí, byly dobré výsledky při hledání jejich průběhu dosaženy metodou nabitého tělesa při nabíjení pažnice stejnosměrným elektrickým proudem, avšak pouze v prostředí, které je odporově poměrně homogenní (např. ve svahových hlínách). Všechny testované metody (nabitě těleso, TURAM, magnetické odporové profilování) se vcelku ukázaly jako nadějně pro zjištění polohy potrubí pod povrchem, avšak značně nepřesné pokud jde o určení hloubky. Nevýhodou použitých geofyzikálních metod je nutnost poměrně rozsáhlých měření a zpracování i nejednoznačná interpretace naměřených hodnot. Nadějně jsou také multielektrodevá měření. Existují však speciální aparatury pro vyhledávání kabelů a kovových potrubí, které pracují na principu elektromagnetické metody.

Georadarová metoda (GPR) patří mezi nejmodernější metody průzkumu mělkých nehomogenit. Slouží k detekci podpovrchových objektů a ke zjišťování stratifikace prostředí. Metoda, na rozdíl od předchozí, umožňuje přesnější lokalizaci liniových objektů a určení hloubky jejich uložení. Na obr. 1 je vidět typický projev kovového i plastového potrubí v georadarovém záznamu - hyperbola s vrcholem v místě uložení potrubí. Telekomunikační, plynárenské, vodárenské a elektrorozvodné firmy používají k nalezení potrubí a kabelů vlastní geoelektrické přístroje a též vlastní metodiku (obojí je determinováno typem používaného potrubí a postupem ukládání).



Obr.1 Ukázka testovacího georadarového měření nad liniovými objekty (podle Goodman, 1994).

Při zpracovávání rešerše o využití geofyzikálních metod pro detekci kabelů a potrubí jsme vycházeli z předpokladu, že umístění, případně existence hledaných prvků jsou zcela neznámé. V opačném případě by bylo možno využít dalších geofyzikálních metod pro stanovení jejich umístění.

Z metodických pravidel pro používání geofyzikálních metod průzkumu a příkladů z literatury (Aldorf et al., 2006a) vyplývá, že:

- ☐ v případě dostatečného kontrastu mezi „hostujícím prostředím“ a hledaným prvkem (kabely, potrubí, ...) lze využít geofyzikální metody,
- ☐ řešíme obrácenou úlohu, tj. k naměřené anomálii hledáme zdroj (jde o nejednoznačnou interpretaci)
- ☐ pro jednoznačnější identifikaci hledaných prvků je vhodné použít současně několik metod na různém fyzikálním principu,
- ☐ nejsnadnější je detekce kovových prvků v relativně jednoduchých geologických podmínkách, následuje detekce kovových prvků ve složitých geologických poměrech nebo v zastavěných oblastech, nejhůře jsou detekovatelné nekovové prvky; jde-li o jednodušší geologické prostředí, lze využít nalezení umělých výkopů,
- ☐ jako nejvhodnější se jeví geoelektrické metody, lze doporučit k ověření metodu multielektrodového odporového měření, případně georadarovou metodu; vždy je třeba předem posoudit vhodnost dané metody s ohledem na geologické podmínky a rušivé vlivy (v měřeném parametru).

MULTIELEKTRODOVÝ SYSTÉM ME-100

Jednou ze základních geofyzikálních metod je geoelektrická metoda, která využívá pro průzkum stejnosměrný, střídavý nebo nestacionární proud. Základní vlastností hornin ovlivňující chování elektrického pole je měrný odpor. V geofyzikálním průzkumu, a to pro hledání a sledování vodičů a nevodičů, pro inženýrsko-geologický a hydrogeologický průzkum a pro geologické mapování, je tato metoda často využívána. S rozvojem nových přístrojů a metodik měření se stále více dostává i do oblasti mělkých aplikací v geotechnickém průzkumu. Jak již bylo uvedeno, předpokládáme, že geoelektrická metoda ve variantě s multielektrodovým systémem bude použitelná i pro detekci vodičů a inženýrských vedení v malých hloubkách.

Multielektrodový kabelový systém ME-100 byl vyvinut na konci osmdesátých let minulého století. Tato technologie představovala významný zvrat ve stejnosměrných geoelektrických metodách, neboť kombinuje metodiku odporového profilování a metodiku sondování. Tím vytváří systém plně automatizovaného sběru dat, který poskytuje řešiteli konzistentní soubor dat s pravidelným vzorkováním v dané svislé rovině. Charakter systému (sada elektrod s pravidelným krokem) umožňuje identifikovat případné nepřesnosti v umístění elektrod (jde o systém s jednoznačně určenými vzájemnými vazbami) a tyto případně korigovat při dalším zpracování, což je principiálně zcela vyloučeno při standardních používaných metodikách odporového profilování či sondování (např. Pazdírek & Bláha, 1997).

Kvalita a (prostorová) hustota dat spolu s poměrně vysokou rychlostí jejich sběru (v průměrných podmínkách probíhá měření rychlostí cca 400 bodů za hodinu) umožňuje řešit úlohy jinými prostředky jen obtížně řešitelné. Postupem doby vznikly dvě principiálně odlišné skupiny systémů:

- ☐ systémy na bázi mnohažilového kabelu (analogie s klasickými mnohakanálovými seismickými systémy), kde vlastní přepínání elektrod (kanálů) probíhá ve zvláštní jednotce, ke které jsou všechny elektrody připojeny,

- ☐ systémy využívající lokálních přepínacích boxů ovládajících případně i několik kanálů a zasílajících informace do řídicí jednotky (analogie moderních seismických telemetrických systémů).

Výhodou prvního systému je potřeba pouze jednoho centrálního přepínacího boxu, nevýhodou je omezená modularita systému a velké nebezpečí poškození velmi drahého mnohažilového kabelu (při použití stovek kanálů je riziko poškození, tzn. zničení, takového kabelu velmi vysoké).

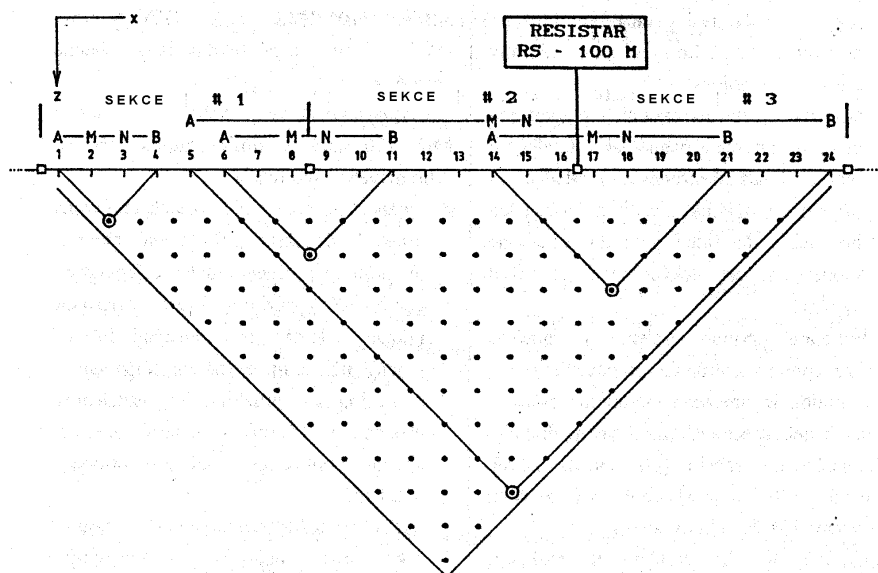
Výhodou druhého systému je prakticky neomezená modularita a neomezený počet použitých kanálů, při vhodné konstrukci lokálních elektrodoých selektorů lze toto zařízení zkonstruovat velmi levně a navíc odpadá riziko poškození drahého mnohažilového kabelu (jednotlivé lokální selektory jsou mezi sebou vzájemně a s řídicí aparaturou propojeny laciným 9 - žilovým kabelem).

Multielektrodový kabelový systém ME-100, který je k dispozici na VŠB – Technické univerzitě Ostrava, náleží ke druhé skupině zařízení. Jeho největší výhody jsou:

- ☐ možnost připojit počet kanálů potřebný právě k dosažení požadované hloubky průzkumu (pro velmi mělký inženýrsko - geologický průzkum často postačuje použití 24 kanálů se vzdáleností elektrod i menší než 2 m,
- ☐ možnost použití techniky tzv. "rolování" sekcí, což umožňuje - postupným přemísťováním pro další měření již nepotřebných sekcí - proměřit profil libovolné délky, tzn. proměřovaný profil nemusí být pokryt roztažením po celou dobu měření.

Podrobnosti k metodickým postupům měření lze nalézt opět například v práci Pazdírk a Bláhy (1997) nebo v článku Hofrichterové (2003).

Podél proměřovaného profilu je roztažen potřebný počet kabelových sekcí (podle požadované hloubky průzkumu - obr. 2), (ekvidistantní) vzdálenost elektrod je zpravidla 2 m (lze samozřejmě i vzdálenost menší - hustější měření). Dle příkazů z řídicí aparatury jsou postupně spínány jednotlivé elektrody pro jednotlivé funkce - proudové elektrody A,B, potenční elektrody M,N. Postupně jsou takto proměřeny veškeré kombinace 4 - elektrodoého uspořádání typu Schlumberger (např. Mareš et al., 1990).



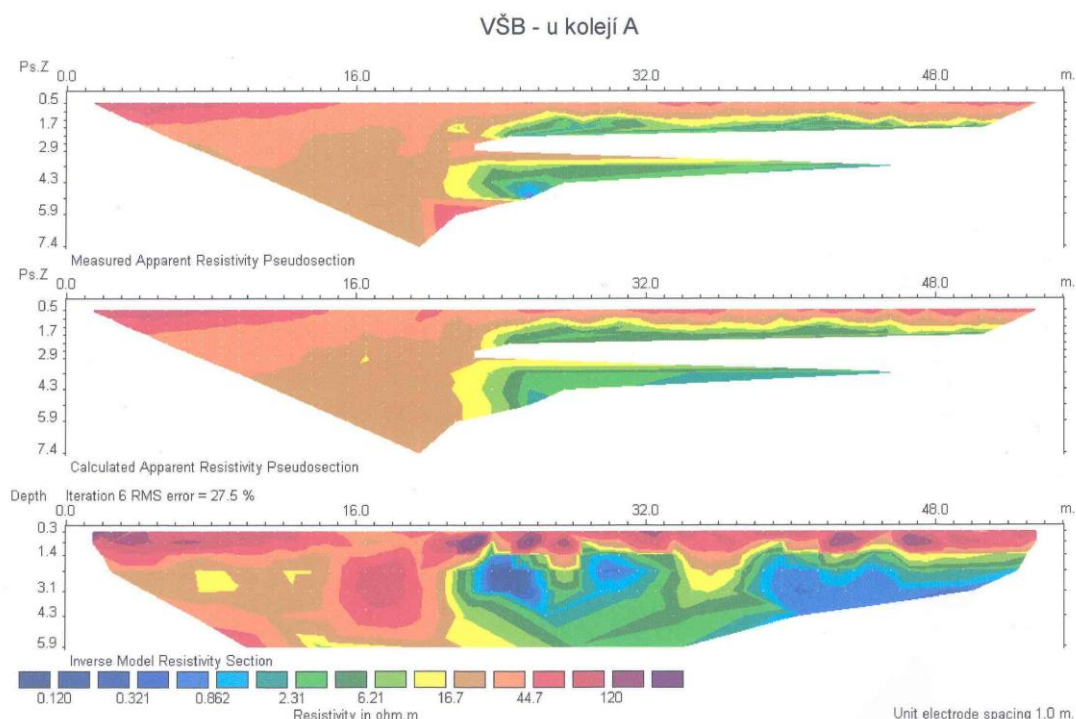
Obr.2 Multielektrodový systém ME-100, základní části a schéma měření.
(A, B – proudové elektrody, M, N – potenční elektrody, RESISTAR – měřící ústředna)

Toto uspořádání je v ČR nejrozšířenější a získaný izoohmický řez poskytuje svým charakterem materiál velmi blízký řezům získaným standardním vertikálním elektrodoým sondováním (VES), co do hustoty informace je takto získaný řez o 1-2 řády podrobnější, jeho kvalita je rovněž podstatně vyšší (prakticky jsou vyloučeny chyby vzniklé nedodržením geometrie uspořádání - ty jsou u VES i odporového profilování prakticky neodhalitelné, případné chyby v geometrii jsou v případě mnohažilového kabelu jednoznačně detekovatelné a následně odstranitelné při zpracování).

PŘÍKLAD EXPERIMENTÁLNÍHO MĚŘENÍ

Experimentální měření bylo realizováno v prostoru kolejí VŠB – TU, v němž je známa jak geologická situace, tak uložení inženýrských sítí. Horninové prostředí (překonzolidované degradované spraše a deluviální hlíny) lze považovat za prakticky homogenní v oblasti realizovaného experimentu. Vlastní měření bylo realizováno 20 elektrodoým uspořádáním měřících elektrod v profilu vytyčeném kolmo na předpokládaný průběh kabelového a trubního vedení (Hofrichterová, Aldorf et al., 2006b).

Výsledky měření byly zpracovány programovým systémem Res2DinV firmy Geotomo Software, příklad je uveden na obr. 3 ve formě tomografických profilů při použití robustní interpretace, která poskytla lepší výsledek než zpracování klasickou cestou. Z obrázku je zřejmé, že podzemní překážky jsou charakterizované zvýšením rezistivity horninového prostředí (spodní část obrázku – inverse model resistivity section). Pro prognózní účely a vymezení polohy a hloubky podzemních sítí se zdá, že metoda robustní interpretace je vhodnější a spolehlivěji vymezuje jak předpokládanou polohu a hloubku, tak dřívější narušení nadloží výkopem pro potrubí a ukazuje, že konzolidace zásypu stavební rýhy není pravděpodobně dosud ukončena. Tato zjištění rovněž dokládá vhodnost použití metody pro predikci překážek v okolí kolektorů.



Obr.3 Příklad tomografických profilů při použití robustní interpretace (převzato z Aldorf et al., 2006b).

ZÁVĚR

Představené příklady a mnoho dalších výsledků prezentovaných v odborné literatuře vede k následujícímu závěru: nejsnadnější je detekce kovových prvků v relativně jednoduchých geologických podmínkách, následuje detekce kovových prvků ve složitých geologických poměrech nebo v zastavěných oblastech, nejhůře jsou detekovatelné nekovové prvky; jde-li o jednodušší geologické prostředí, lze využít nalezení umělých výkopů. Geofyzikální metody pracují na principu detekce změn v daném fyzikálním poli. Jedná se tedy téměř vždy o nepřímé měření, tj. z anomálního projevu měřené fyzikální veličiny se interpretuje pravděpodobný původce. Nelze tedy očekávat vždy stoprocentní úspěšnost detekce hledaných potrubí a kabelů, úspěšnost se snižuje:

- ☐ s komplikovaností geologického prostředí,
- ☐ nárůstem počtu rušivých vlivů v měřeném fyzikálním poli,
- ☐ při složité geometrii prostředí a hledaných prvků,
- ☐ se zvětšováním hloubky uložení hledaných prvků,
- ☐ při menším kontrastu mezi hledaným prvkem a okolím (v měřené fyzikální vlastnosti).

Pro prognózování inženýrských překážek při ražení podzemních děl (kabely, kovová a nekovová potrubí apod.) doporučujeme využívat tabulku 1, uvádějící doporučené metody pro detekci kabelů a potrubí (sestaveno podle poznatků z odborné literatury).

Tab.1 Doporučené metody pro detekci kabelů a potrubí.

geofyzikální metoda ++ vhodná metoda + doplňková metoda (+) ojediněle	kabely z elektricky vodivých materiálů	kovová potrubí	kabely z elektricky nevodivých materiálů	kameninová a PVC potrubí
multielektrodová metoda	++	++	++	++
georadarová metoda	+	++	++	++
kombinované odporové profilování	++	++		
měření VDV	++	++		
metoda nabitého tělesa (při zastížení části)	++	++		
detektory kovů (elektromagnetická metoda)	++	++		
dipólové elektromagnetické profilování (DEMP)	+	++		
magnetometrická a gradio-magnetická měření	(+)	(+)		
seizmická měření s vibračním zdrojem	(+)	(+)	+	++
termická měření			(+)	(+)

Poznátky uvedené v tomto příspěvku ukazují, že pro detekci potrubí, kovových i nekovových, a kabelů se jako nejvhodnější z geofyzikálních metod jeví geoelektrické metody. Další metody, například magnetická měření, jsou využívány mnohem méně. Nejčastěji dokladovaná úspěšná experimentální měření použila georadarová měření, konduktometry a geoelektrická odporová měření, např. metodu multielektrodového odporového měření. Vždy je třeba předem posoudit vhodnost dané metody, respektive souboru metod, s ohledem na geologické podmínky a rušivé vlivy (v měřeném parametru) a doporučuje se využít, s ohledem na geologické podmínky a vlivy prostředí souboru vzájemně se doplňujících metod.

Tento příspěvek byl zpracován za podpory projektu GAČR 105/05/2712 "Ražení kolektorů v oblastech dotčených hornickou činností" a projektu ČBÚ 38-05 "Vedení podzemních děl v souvislé městské zástavbě".

LITERATURA

- [1] Aldorf, J., Kaláb, Z., Lednická, M. & Sedlářová, H. (2006a): Doporučení způsobu ochrany před střetem s podzemními inženýrskými sítěmi jednak během ražby, ale i při vrtacích pracích (případně protlacích) – Analýza metod pro detekci a vyhledávání inženýrských sítí. Oponovaná zpráva k řešení etapy E9 projektu ČBÚ 38/05 Vedení podzemních děl v souvislé městské zástavbě, VŠB – Technická univerzita Ostrava, 10 stran.
- [2] Aldorf, J., Kaláb, Z., Hofrichterová, L., Hrušešová, E., Vojtasík, K., Ďuriš, L. & Marek, R. (2006b): Doporučení způsobu ochrany před střetem s podzemními inženýrskými sítěmi jednak během ražby, ale i při vrtacích pracích (případně protlacích) – Multielektrodová metoda. Oponovaná zpráva k řešení etapy E9 projektu ČBÚ 38/05 Vedení podzemních děl v souvislé městské zástavbě, VŠB – Technická univerzita Ostrava, 24 stran.
- [3] Aldorf, J., Kaláb, Z., Hofrichterová, L., Hrušešová, E., Vojtasík, K., Ďuriš, L. & Marek, R. (2007): Doporučení způsobu ochrany před střetem s podzemními inženýrskými sítěmi. - Závěrečná výzkumná zpráva. Oponovaná zpráva k řešení etapy E9 projektu ČBÚ 38/05 Vedení podzemních děl v souvislé městské zástavbě, VŠB – Technická univerzita Ostrava, 14 stran, nepublikováno.
- [4] Goodman, D. (1994): Ground Penetration Radar Simulation in Engineering and Archeology. Geophysics No. 59, 224-232.
- [5] Hofrichterová, L. (2003): Využití multielektrodových rezistivitních měření v inženýrské geofyzice při průzkumu protipovodňových hrází a svahových deformací. Transactions of the VSB-TUO, řada stavební, 2/2003, 85-90.
- [6] Karous, M. (1998): Geofyzikální metody v inženýrské geologii a geotechnice. Geonika, s.r.o., Praha, účelová publikace.
- [7] Mareš, S. et al. (1990): Úvod do užití geofyziky. SNTL – Nakladatelství technické literatury, Praha.
- [8] Mareš, S. et al. (2003): Současný stav rozvoje geofyzikálních metod pro řešení problémů v oblasti životního prostředí. Studie pro MŽP ČR, Praha.
- [9] Pazdírek, O. & Bláha, P. (1997): Mnohaelektrodový kabelový systém ME-100, principy, příklady použití. In: Kaláb, Z. (ed.): Výsledky nových studií v SL a IGf. Sborník referátů, Ústav geoniky AVČR, Ostrava, 68-76.

Oponentní posudek vypracoval: Doc.RHDr. Pavel Bláha, DrSc.

